Lü Jingtian, Zhang Xiaoxin, Lin Ruilin, He Fei, Jiang Yong. Dynamic distribution features of energetic proton in South Atlantic anomaly based on the observation of SAMPEX (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(2): 192-202, doi:10.11728/cjss2015.02.192

基于 SAMPEX 卫星观测的南大西洋异常区高能质子动态分布特征*

吕景天[1,2] 张效信[2] 林瑞淋[3] 何 飞[4] 蒋 勇[1]

1(南京信息工程大学数学与统计学院 南京 210044)

2(中国气象局国家空间天气监测预警中心 北京 100081)

3(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

4(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要 利用 SAMPEX 卫星 1992 年 7 月至 2004 年 6 月 19∼27 MeV 高能质子数据对南大西洋异常区的分布特征进行研究, 发现南大西洋异常区高能质子分布随高度及 $F_{10.7}$ 的变化十分显著. 在 540±25 km 高度上, 地磁较为平静时期南大西洋异常区高能质子微分通量随着 $F_{10.7}$ 的增大而减小, 同时在 $F_{10.7} \geqslant 115$ sfu 时减小趋势较为平缓. 对中等及以上磁暴进行统计分析发现, 磁暴期间南大西洋异常区高能质子微分通量和 SYM-H 指数的绝对值存在明显的反相关关系, 且地磁暴对南大西洋异常区高能质子微分通量存在明显的持续影响效应. 磁暴发生期间高能质子微分通量明显减少. 磁暴恢复相及其之后高能质子微分通量呈现较为显著的恢复过程.

关键词 内辐射带, 南大西洋异常区, 磁暴, 高能质子微分通量, $F_{10.7}$ 指数

中图分类号 P 352

Dynamic Distribution Features of Energetic Proton in South Atlantic Anomaly Based on the Observation of SAMPEX

LÜ Jingtian[1,2] ZHANG Xiaoxin[2] LIN Ruilin[3] HE Fei[4] JIANG Yong[1]

1(*School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

2(*National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

3(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

4(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033)

Abstract After lots of experiments by using 19∼27 MeV differential energetic proton data based on the observation of SAMPEX from July of 1992 to June of 2004, it is found that the change of

* 国家重点基础研究发展计划项目资助 (2012CB957803)

2014-03-03 收到原稿, 2014-10-14 收到修定稿

E-mail: lvjt@foxmail.com. 通信作者张效信, E-mail: xxzhang@cma.gov.cn

$F_{10.7}$ and altitude have a great influence on the distribution of differential energetic proton flux in South Atlantic Anomaly. During the geomagnetic quiet time at 540±25 km altitude, the energetic proton flux in South Atlantic Anomaly decreased with the increasing of $F_{10.7}$, and the variation trend was flat when $F_{10.7} \geqslant 115$ sfu. It is found that there was obviously an anti-correlation between the absolute value of SYM-H and the differential energetic proton flux in South Atlantic Anomaly for storms with SYM-$H < -50$, and also there was a lasting effect on differential energetic proton flux in South Atlantic Anomaly. In addition, the proton flux could be significantly reduced in South Atlantic Anomaly during the main phase, while the proton flux showed a substantial resuming trend in the recovery phase of geomagnetic storms.

Key words Inner radiation belt, South Atlantic Anomaly, Geomagnetic storm, Differential energetic proton flux, $F_{10.7}$ index

0 引言

关于辐射带的研究, 从长期变化来看, 与内辐射带电子相比, 传统上认为内辐射带质子更加稳定. Li 等 [1] 利用 SAMPEX 卫星观测数据, 发现在 $L < 2$ 的区域质子较为稳定, 仅与 11 年太阳活动周期有关. Shi 等 [2] 研究了 NOAA-15 卫星近 13 年的高能质子全向通量观测资料, 发现低高度内辐射带高能质子通量与太阳活动水平的反相关关系以及磁壳参数 L 值和磁场 B 值有关. L 越低, B 越大的空间点, 其高能质子通量与太阳活动水平的反向相关性越明显. 但是随着对辐射带研究的不断深入, 内辐射带受到地磁扰动影响的短期变化不断受到重视. 有研究表明, 剧烈的地磁扰动可能扩展到很低 L 值的区域. Miyoshi 等 [3] 通过 NOAA 和 Exos-D 卫星的数据发现, 在 2003 年 11 月 3 日的剧烈地磁活动期间有能量达到几十 MeV 的电子和质子突然注入到 $L = 3.0$ 的区域. Looper 等 [4] 根据 SAMPEX 卫星观测结果发现, 在 2003 年 10 月底至 11 月初 Halloween 事件发生期间, $L = 2.0$ 区域 10~29 MeV 的质子几乎完全消失, 直到几个月后才恢复, 而在 2003 年 10 月以前 SAMPEX 卫星观测结果中却没有发现类似事件. Zou 等 [5] 考察了从 1998−2005 年期间 3 颗太阳同步轨道卫星 (NOAA15, 16, 17) 在大磁暴期间 $L \leqslant 3$ 时高能质子 (35~70 MeV, 70~140 MeV, 140~500 MeV) 的观测结果, 发现在磁暴期间内辐射带外围存在质子损失事件, 并且 HEO-3 卫星质子 (8.5~35 MeV, 16~40 MeV, 27~45 MeV) 观测结果也发现了类似的现象. 此外, 辐射带模式更新较为缓慢, 目前相对陈旧的 AP-8/AE-8 模式依然被广泛应用. 虽然提供了 AP-8/AE-8 MAX 和 AP-8/AE-8 MIN 两种分别针对于太阳活动高年和低年的模式, 但其并没有给出相应的误差范围 [6]. CRRES[7], NOAA/TIROS[8], LANL-GEO[9], SAMPEX[10] 和 Polar[11] 等卫星开发出了一些新的模式, 但是对于能量范围、时间分布和空间分布却很难统一, 缺少类似 AP8/AE8 的行业标准模式. 最新 AP9/AE9/SPM 模式距离普及仍需要一段时间.

南美洲南部以及南大西洋海域存在一处很强的地磁场异常区域, 通常称为南大西洋磁异常区 (SAMA)[12], 该区域地磁场表现出很强的负磁异常特性. 被捕获粒子由于要保持三个绝热不变量的守恒, 在这里会下降到一个较低的高度. 由于南大西洋磁异常区为负磁异常区, 使得内辐射带在该区域的高度明显降低, 其最低高度可降至 200 km 左右 [13], 形成辐射带的南大西洋异常区 (SAA). 南大西洋异常区是引起低轨道航天器辐射危害严重的区域, 也是带电粒子诱发异常或故障的高发区. 在该区域中心, 高能质子通量往往是宇宙线背景的数百倍 [14]. 对于南大西洋异常区的研究主要集中在长期变化和位形描述上, 短期变化方面的研究相对较少. Gautam 通过计算发现, 在 1973−1995 年内南大西洋异常区以每年 $0.28° \pm 0.03°$ 向西漂移 [15]. Hell 等 [16] 利用 RHESSI 卫星 2002−2010 年的电子和质子数据对南大西洋异常区的位形和时间演化进行了分析, 提出利用 Gumbel 方程来代替过去的 Weibull 方程, 以更为精确地表达南大西洋异常区的质子和电子通量分布情况. Pu 等 [17] 提出了估算内辐射

带低高度辐射强度的漂移壳追踪法 (DSTM), 并且利用其研究了南大西洋异常区的辐射带结构, 通过计算发现经过 30 年的长期变化, 南大西洋异常区区域漂移壳下沉约 200 km, 质子和电子的通量明显增强. 对于南大西洋少量的短期变化研究主要集中在电子方面. Lin 等 [18] 利用 ROCSAT-1 低轨卫星在 2000 年 7 月 15 日一次磁暴期间的观测数据, 发现在磁暴期间南大西洋异常区附近有明显的高能粒子沉降. Asikainen 等 [19] 利用 NOAA/SEM-2 卫星测得的大于 30 keV 的电子数据研究了磁暴期间电子的漂移情况, 发现在磁暴主相之后许多电子在南大西洋异常区内被捕获. 2008 年 Asikainen 等 [20] 还利用 NOAA 15 和 NOAA 16 卫星 30 keV~2.5 MeV 的高能电子数据, 研究了 $L<2$ 区域高能电子在南大西洋异常区内的特征, 南大西洋异常区内高能电子沉降具有明显的晨昏不对称性.

随着近地轨道在轨航天器的逐渐增多, 对于空间天气效应的研究日渐深入. 空间天气效应中的单粒子事件与航天器所处区域的高能质子分布密切相关. 如果偶然发生单粒子事件, 可以通过编码转置来进行矫正, 但是若频繁发生单粒子事件, 即可导致航天器永久失效. 1993 年期间 TOPEX/Poseidon 卫星遭遇多次单粒子事件 [21], 高能质子碰撞到电子部件的芯片上时, 在芯片的 PN 结产生电荷使逻辑电路发生非正常电位翻转 [22], 对其载荷的正常工作产生了重大影响. 1991 年 2 月 14 日风云一号 B 星的计算机发生单粒子事件, 卫星姿态出现异常, 这次故障未能及时发现, 姿态完全失控, 导致原本设计运行一年的卫星不到半年就无法正常工作 [23]. Gu 等 [24] 对 1991 年美国发射的 5 个不同倾角的 LEO 轨道航天器所遇到的单粒子事件进行了研究, 发现在极区和南大西洋异常区发生了大量单粒子事件. 从地理位置分布来看, STS-44 航天器所遭遇的单粒子事件几乎全部发生在南大西洋异常区, 这说明南大西洋异常区的粒子环境与单粒子事件高度相关. 并且在统计地磁活动与单粒子事件之间的关系时发现, 在地磁活动较强时单粒子事件发生的概率明显增高.

可以看出, 对于南大西洋异常区的研究相对局限, 目前主要集中在长时间的位形演化和磁暴期间短期内的电子沉降, 对于磁暴期间质子在此区域内的分布研究较少. 并且该区域高能质子的分布特征对与预估 LEO 轨道航天器通过该区域时轨道上的高能质子通量、保障在轨航天器载荷的正常运行以及航天员出舱等航天任务都具有重要意义, 因此研究不同情况下南大西洋异常区高能质子通量分布非常重要.

本文利用 SAMPEX 卫星在 1992 年 7 月至 2004 年 6 月期间测得的 19~27 MeV 高能质子数据, 考察了不同条件下南大西洋异常区高能质子通量的分布情况.

1 数据分布情况

SAMPEX (Solar Anomalous and Magnetospheric Particle Explorer) 是 NASA 小型探测器计划的第一颗卫星. SAMPEX 卫星的近地点高度为 520 km, 远地点高度为 670 km, 轨道倾角为 82°, 轨道周期为 96.6 min. SAMPEX 卫星运行轨道并非太阳同步轨道, 而是近似于极轨 [25]. 在 SAMPEX 任务后期, 卫星姿态发生变化造成卫星轨道下降约 50 km. 卫星相关科学任务开始于 1992 年 7 月 6 日, 并于 2004 年 6 月 30 日结束. 利用 Caltech* 提供的 SAMPEX 卫星上 PET 仪器测得的时间分辨率为 6 s, 能量为 19~27 MeV 的高能质子微分通量数据对南大西洋异常区的分布特征进行研究. 地磁指数采用了 Kyoto** 提供的分辨率为 1 min 的数据 (SYM-H 指数). $F_{10.7}$ 由 NGDC*** 提供. 将 SYM-H 指数和 $F_{10.7}$ 指数线性插值到卫星数据中, 并且根据 SAMPEX 的轨道数据选出卫星经过南大西洋异常区时的数据集. 结果表明, 1992 年 7 月至 2004 年 6 月期间 SAMPEX 卫星通过南大西洋异常区时的轨道高度约为 450~690 km. 利用椭圆区域选取方法将南大西洋异常区数据从原始数据中提取出来, 以 (−24°W, −27°S) 为中心, 半长轴选取 71°, 半短轴选取 33°, 对数据进行椭圆区域切割, 共得到数据样本点 6 571 186 个. 对所有卫星穿越南大西洋异常区时不同轨道高度的数据分布情况进行统计分析, 在 450~700 km 高度之间, 分别取每 10 km 高度为一个间隔, 上下各 5 km 的数据作为一个数据集. 如图 1

*http://www.srl.caltech.edu/sampex/DataCenter/data.html
**http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html
***ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/solar_radio/flux/

所示, 数据在高度上的分布并不均匀, 不同高度上数据量差异较大, 大量数据主要集中在 540 km 左右.

在分析高度、$F_{10.7}$ 指数及 SYM-H 与南大西洋异常区的相互关系时, 对各样本点数据集进行了平均处理和平滑处理. 以所有数据点为样本点数据集为例, 首先在经度 93°W 至 47°E, 纬度 60°S 至 5°N 区域, 建立 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格点, 查找出各网格点附近 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 区域内的数据, 从而获取各网格点上的样本点, 然后将各网格点上的样本点按质子微分通量数据进行从小到大排序, 滤除其中 5% 较小的数据点, 对剩下数据求平均, 从而获得各网格点上质子微分通量平均值, 其结果如图 2(a) 所示. 为得到比较光滑的南大西洋异常区图像, 比较不同条件下南大西洋异常区的变化情况, 再对各网格点平均值数据以 5° 为半径进行平滑处理, 其结果如图 2(b) 所示. 从图 2 比较可知, 平滑后的图像与平均值图像基本相同, 并且平滑掉了平均值数据出现的一些不光滑的过渡区域.

2 南大西洋异常区高能质子动态分布特征

根据以往其他卫星的相关研究成果 [15−16,19], 可以了解到空间位置、太阳 $F_{10.7}$ 指数和地磁暴对质子辐射带中高能质子通量具有显著的影响. 因此在研究南大西洋异常区动态分布统计特征时, 这三个要素的影响必须考虑. 在 SAMPEX 卫星观测数据样本点中, 高度的覆盖范围为 449~703 km, 太阳 $F_{10.7}$ 指数的覆盖范围为 65.7~325.1 sfu, 地磁 SYM-H 指数的覆盖范围为 −474~124 nT. 因此认为这些样本数据可以很好地分析不同高度上 $F_{10.7}$ 指数和 SYM-H 对南大西洋异常区的影响.

2.1 不同高度南大西洋异常区高能质子通量分布

为了研究不同高度上南大西洋异常区高能质子通量的分布, 不仅需要将数据按高度进行分组, 同时还需要考虑或去除 $F_{10.7}$ 和 SYM-H 的影响. 为此在所有样本点 (6 571 186 个样本点) 数据中, 首先去除地磁扰动可能带来影响的样本点, 获得平静时的样本点数据; 之后对于平静时的样本点数据在 450~700 km 高度上按 10 km 的间隔进行分组; 最后在每个高度数据组中再按 $F_{10.7} < 115$ sfu 和 $F_{10.7} \geqslant 115$ sfu 分成两组. 以 $F_{10.7} = 115$ sfu 作为分界线, 一方面是考虑到在平静时的数据点中按 $F_{10.7} < 115$ sfu 和 $F_{10.7} \geqslant$

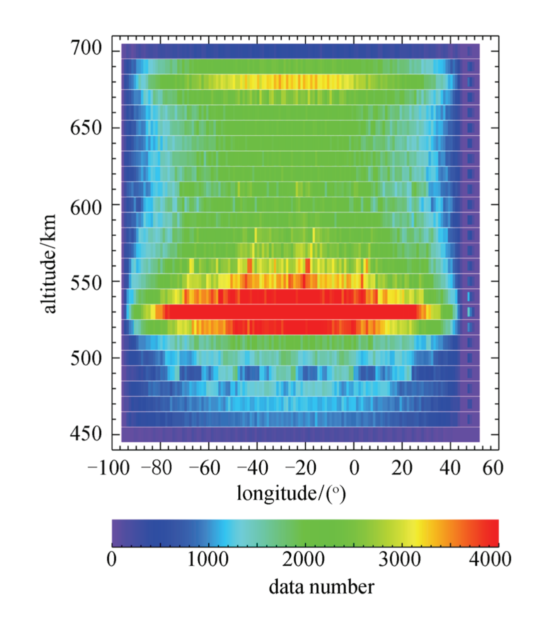


图 1 SAMPEX 卫星穿过南大西洋异常区时不同高度上数据量的分布情况

Fig. 1 SAMPEX SAA crossing data number distribution at different altitudes

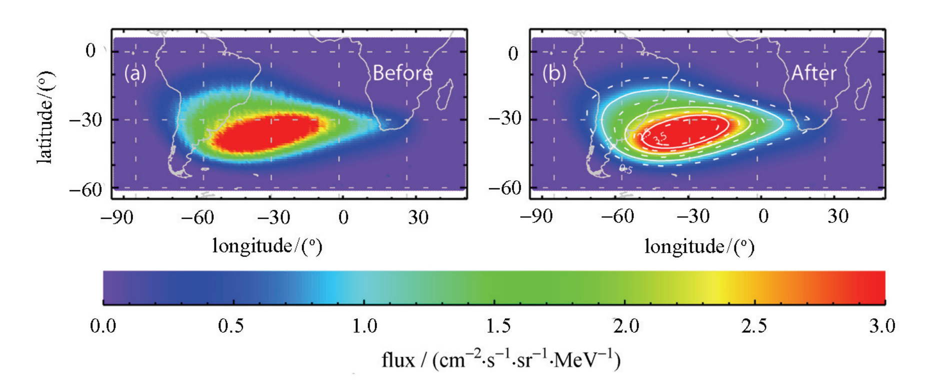


图 2 南大西洋异常区数据网格点平均值显示效果 (a) 与平滑后 (b) 显示效果的对比

Fig. 2 Display of SAA average grid data before (a) and after (b) grid smoothing

115 sfu 分组尽可能均匀, 另一方面是考虑到 $F_{10.7}<$ 115 sfu 和 $F_{10.7}\geqslant$ 115 sfu 对南大西洋异常区高能质子通量影响的差异.

为了去除地磁扰动可能带来的影响, 本文收集了 1992 年 7 月至 2004 年 5 月期间中等及其以上地磁暴事件 (SYM-$H\leqslant -50$ nT) 发生时 SYM-H 指数最小值所对应的时间, 共 277 个事例. 考虑到地磁扰动对南大西洋异常区的影响可能是瞬时的, 也可能地磁扰动过后还会持续影响, 所以在所有样本点中, 不仅去除了 SYM-$H<-30$ nT 的样本点, 同时也去除

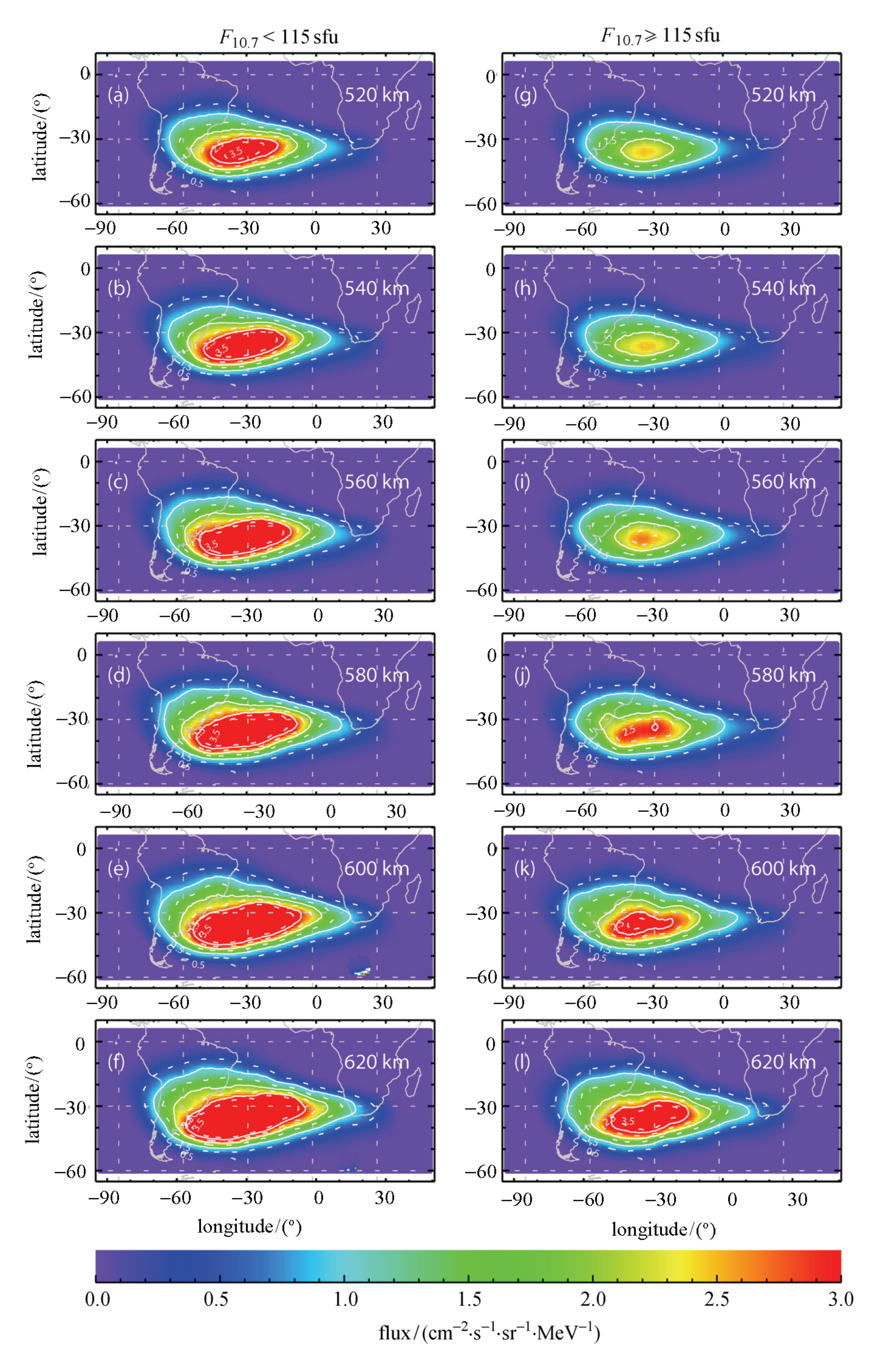


图 3 地磁平静时期基于 SAMPEX 卫星观测的不同高度上南大西洋异常区 19～27 MeV 高能质子微分通量分布

Fig. 3 Distributions of 19～27 MeV differential energetic proton flux at different altitudes during the geomagnetic quiet time based on the observation of SAMPEX

了中等及以上磁暴最小 SYM-H 时刻之后 10 天的样本点数据. 通过该方法获取平静时的样本点数据, 从而排除了地磁暴造成的影响.

图 3 显示了地磁平静时期当 $F_{10.7}$ < 115 sfu 以及 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 时各高度上南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量的分布. 图 3 所采用的数据为平滑后的数据, 处理过程如第 1 节中所述 (仅显示了部分高度结果). 从图 3 可以看出, 各高度上 $F_{10.7}$ < 115 sfu 所得 19~27 MeV 高能质子微分通量明显要比 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 所得结果强, 异常区的范围也比较大; 无论对于 $F_{10.7}$ < 115 sfu 还是 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 的情况, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量的大小和范围均随高度的增加而增大或增强, 不过其形态基本保持类似.

图 4 给出了 520~680 km 各高度组所得平滑后的南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量的峰值通量随高度的变化. 在其他高度上, 由于 $F_{10.7}$ < 115 sfu 或 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 区间内数据不足, 没有给出结果. 从图 4 可以看出, 在 $F_{10.7}$ < 115 sfu 情况下, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量峰值基本随高度呈线性增长趋势; 在 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 情况下, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量峰值随高度的增加而增大, 不过在 520~560 km 高度上, 其增加的速度比较缓慢, 而后随着高度的增加, 峰值通量随高度增加的速度不断上升, 在 590 km 高度以上, 峰值通量增长速度与 $F_{10.7}$ < 115 sfu 情况下的增长速度趋于一致; 520~680 km 高度上, 在 $F_{10.7}$ < 115 sfu 情况下, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量峰值基本上是 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 情况所得结果的 1.5~2.0 倍.

需要注意的是, 以上结果所采用的数据虽然去除了地磁扰动可能带来的影响, 但对于 $F_{10.7}$ 可能带来的影响, 仅分了两种情况. 因此其定量的结论只能是针对于 $F_{10.7}$ < 115 sfu 或 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 情况下的平均结果.

2.2 $F_{10.7}$ 对南大西洋异常区高能质子通量分布的影响

在分析 $F_{10.7}$ 对南大西洋异常区的影响时, 同样需要去除高度和地磁扰动可能带来的影响. 根据 2.1 节的分析可知, 当 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 时, 在 520~560 km 高度组, 即 515~565 km 区间, 所得到的南大西洋异常区随高度的增加速度比较缓慢; 在该高度区间上, 当 $F_{10.7}$ < 115 sfu 时, 南大西洋异常区峰值通量虽然随高度增长的速率与其他高度一致, 但其整体通量强度的变化不是很明显, 如图 2 所示. 因此这里选取 540±25 km 区间范围内的数据来分析 $F_{10.7}$ 对南大西洋异常区的影响. 同时采用与 2.1 节同样的方法去除地磁扰动可能带来的影响. 进而将这些平静时期 540±25 km 区间高度上的数据按 $F_{10.7}$ 的数值进行分组, 从 60±10 sfu 分到 300±10 sfu, 即每组间隔为 20 sfu.

图 5 给出了地磁平静时期在 540±25 km 区间高度每组 $F_{10.7}$ 所得到的南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量的分布, 图 5 仍然显示的是平滑后的数据结果. 从图 5 可以看出, 随着 $F_{10.7}$ 的增加, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量峰值不断减小; 在 $F_{10.7} \leqslant$ 110 sfu 的数据组中, 随着 $F_{10.7}$ 增加, 南大西洋异常区中心区域的辐射强度减弱很快, 覆盖的区域减小也比较明显, 但在 $F_{10.7}$ > 110 sfu 的数据组中, 南大西洋异常区中心区域的辐射强度减弱很慢, 覆盖区域变化也比较缓慢. 在 540±25 km 区间范围内的南大西洋异常区, 其 L 值可变化到 3.3 左右, 可见 $F_{10.7}$ 对质子辐射带内边缘低高度区域的影响 L 值可拓展到 3.3.

图 6 显示了地磁平静时期, 在 540±25 km 区间高度上每组 $F_{10.7}$ 所得到的南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量峰值随高度的变化情况. 从图 6 可以看出, 当 $F_{10.7}$ = 60±10 sfu 和 $F_{10.7}$ = 80±10 sfu 时, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量峰值可以达到 4.8 $cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}\cdot MeV^{-1}$ 左

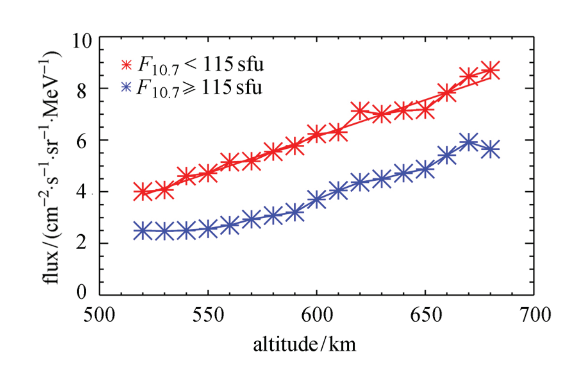


图 4 $F_{10.7}$ < 115 sfu 和 $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu 时地磁平静时期南大西洋异常区高能质子微分通量最大值随高度的变化

Fig. 4 Peak value of differential energetic proton flux at different altitudes during the geomagnetic quiet time ($F_{10.7}$ < 115 sfu and $F_{10.7} \geqslant$ 115 sfu)

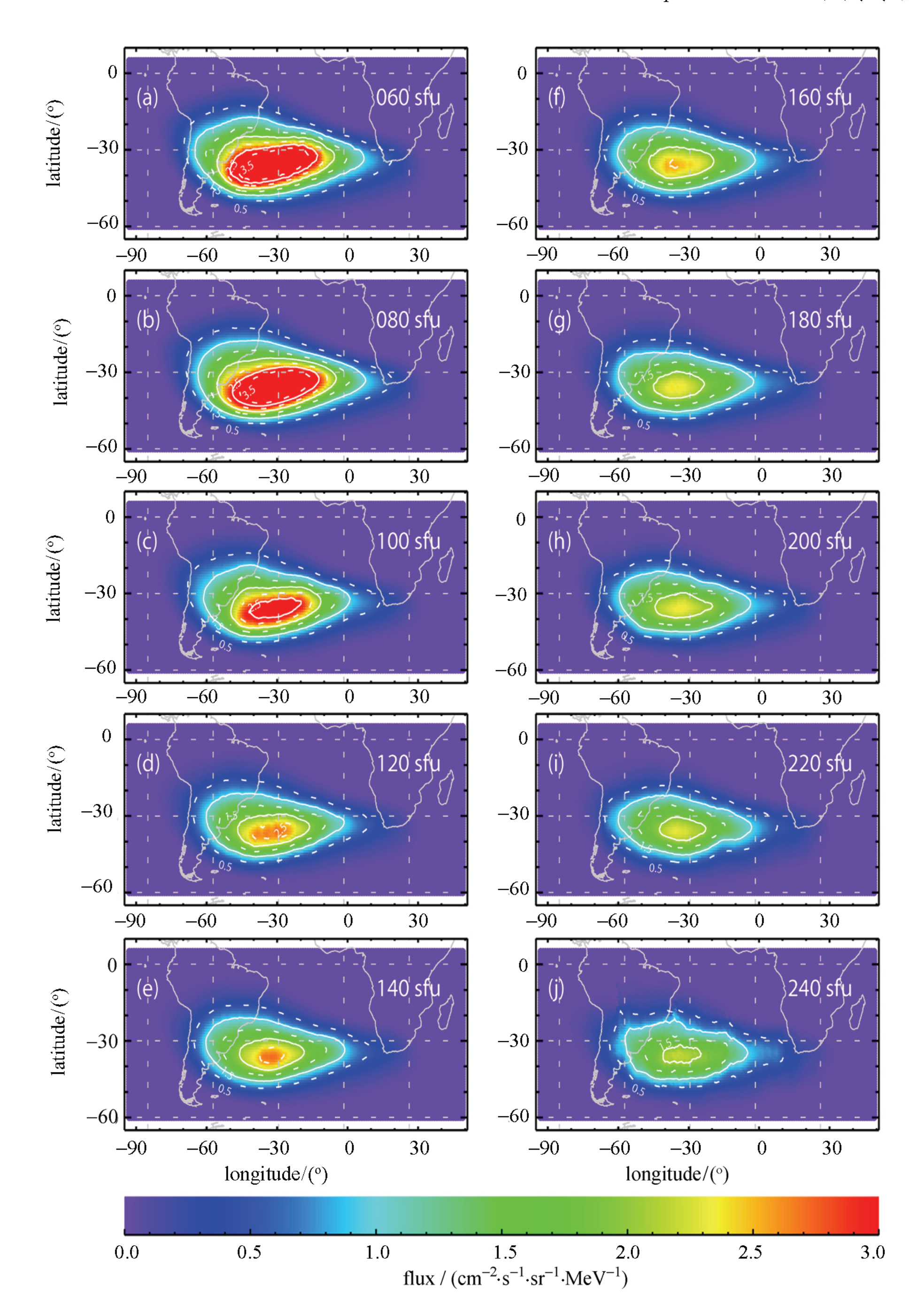


图 5 540±25 km 时 $F_{10.7}$ 对基于 SAMPEX 卫星观测的南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量分布的影响

Fig. 5 Distributions of 19~27 MeV differential energetic proton flux at 540±25 km for the influence of $F_{10.7}$ based on the observation of SAMPEX

右, 随着 $F_{10.7}$ 的不断增加, 其微分通量峰值趋向于 2.0 cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·MeV^{-1}, 即随着 $F_{10.7}$ 的增加, 微分通量峰值减少可超过一半.

从图 5 和图 6 分析可知, 当 $F_{10.7} \geqslant 115$ sfu 时, $F_{10.7}$ 对 540±25 km 区间高度上南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量分布的影响还是比较小的. 因此 2.1 节中得到的 $F_{10.7} \geqslant 115$ sfu 时高度对南大西洋异常区影响的定量结果还是可靠的, 基本排除了 $F_{10.7}$ 带来的影响.

2.3 地磁暴对南大西洋异常区高能质子通量分布的影响

基于以上分析结果, 如果选取 540±25 km 区间

高度上的数据, 并且确保这些数据所对应的 $F_{10.7} \geqslant 115\,\text{sfu}$, 则基本可以粗略排除高度及 $F_{10.7}$ 对南大西洋异常区的影响, 从而可以较可靠地研究地磁扰动对南大西洋异常区的影响. 由于地磁暴对南大西洋异常区高能质子通量的影响可能存在瞬时影响效应, 也可能地磁暴过后其影响效应还一直持续, 或者两者效应同时存在. 因此需要分为瞬时影响效应和持续影响效应两种情况来考虑.

为了研究瞬时效应, 将 540±25 km 区间高度上 $F_{10.7} \geqslant 115\,\text{sfu}$ 的数据按 SYM-H 指数的大小进行分组, 基于数据量的考虑, 仅分为四组, 即

$$\text{SYM-}H \geqslant 0\,\text{nT},$$

$$-30\,\text{nT} \leqslant \text{SYM-}H < 0\,\text{nT},$$

$$-50\,\text{nT} \leqslant \text{SYM-}H < -30\,\text{nT},$$

$$-100\,\text{nT} \leqslant \text{SYM-}H < -50\,\text{nT}.$$

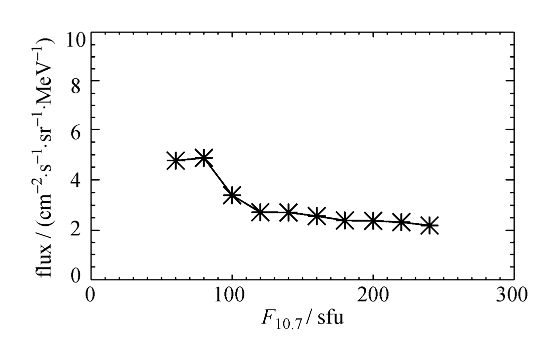


图 6 540±25 km 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量最大值随 $F_{10.7}$ 的变化

Fig. 6 Peak value of 19~27 MeV differential energetic proton flux at 540±25 km for the influence of $F_{10.7}$

图 7 给出了这四组数据经过平滑后的南大西洋异常区结果. 从图 7 可以看出, 随着 SYM-H 指数的减小, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量不断减弱, 其覆盖的区域范围也不断减小; 四组数据经过平滑后的峰值通量分别为 2.76, 2.46, 2.23, 2.38 $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}$. 可见地磁扰动对南大西洋异常区瞬时效应的影响还是比较明显的.

为了进一步研究地磁扰动对南大西洋异常区持续影响的情况, 采用 2.1 节中所用到的 277 个中等及其以上地磁暴 (SYM-H $\leqslant$ -50 nT) 事件发生时 SYM-H 指数最小值所对应的时间表. 以这些地磁暴最小 SYM-H 指数值所对应的时间为分界线, 每两天一个间隔, 分别计算出磁暴前 2 天 (前 48 h), 磁暴后 2 天 (后 48 h)、3~4 天、5~6 天、7~8 天等在 540±25 km 区间高度上 $F_{10.7} \geqslant 115\,\text{sfu}$ 时南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量分布情况, 其结果如图 8(a)~(i) 所示. 之所以采用两天作为间隔时间, 主要是受到数据量少的限制. 同时还给出了地磁平静时期该高度区域 $F_{10.7}$ 范围南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量分布, 如图 8(j) 所

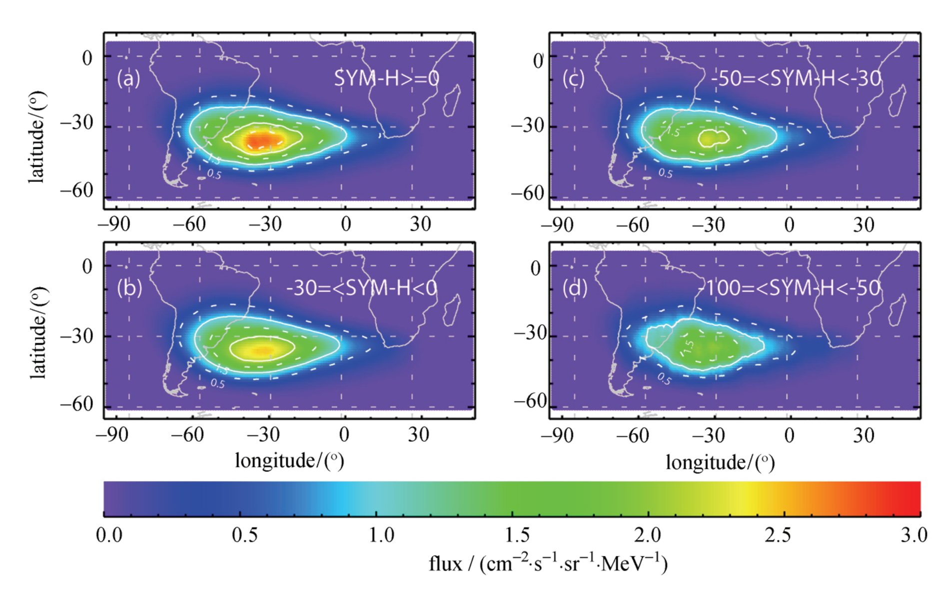


图 7 1992 年 7 月至 2004 年 6 月不同 SYM-H 区间内基于 SAMPEX 卫星观测的南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量的分布

Fig. 7 Distributions of 19~27 MeV differential energetic proton flux in different SYM-H bins based on the observation of SAMPEX

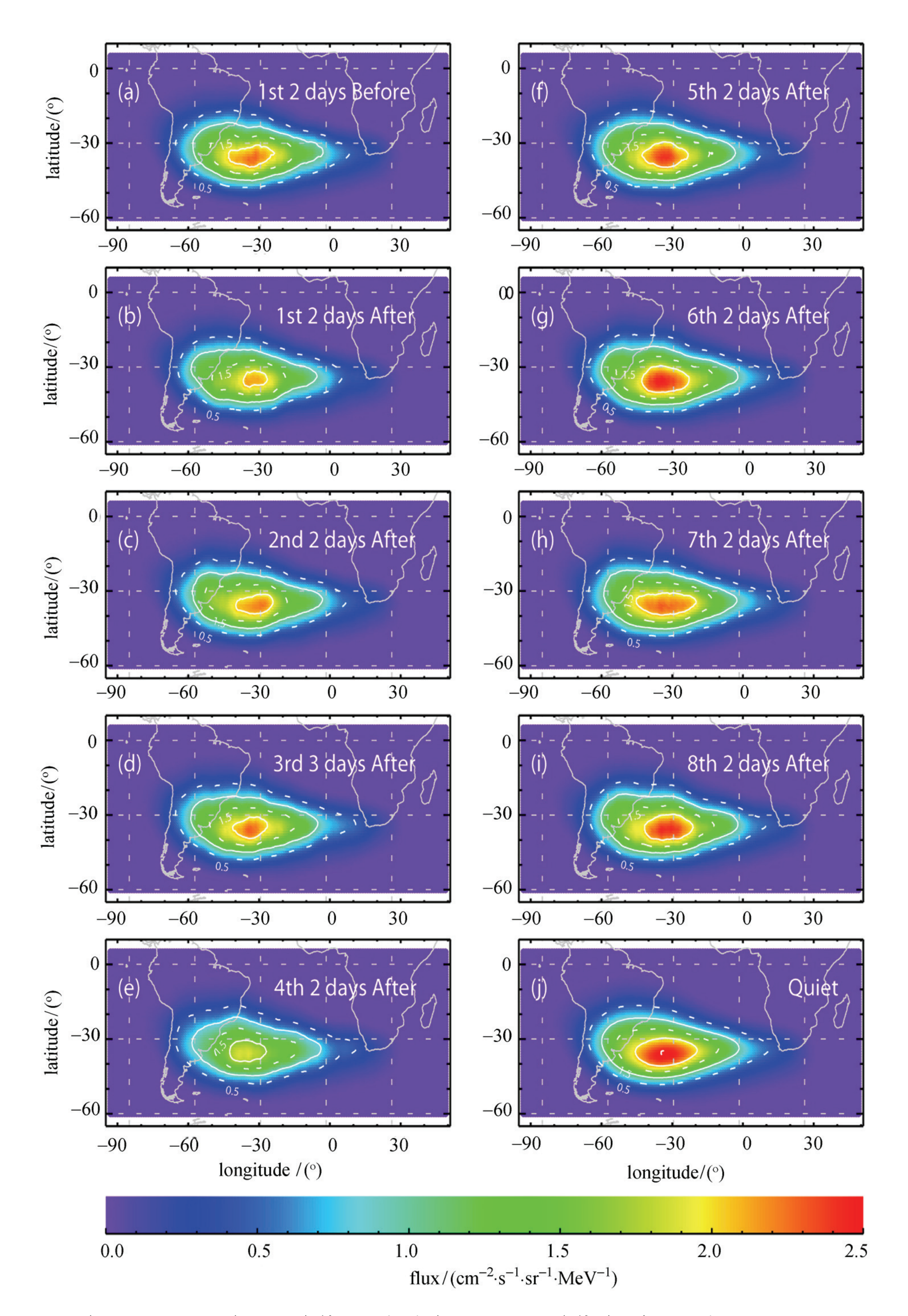


图 8 1992 年 7 月至 2004 年 6 月中等及以上磁暴 SYM-H 最小值前后每两天内 SAMPEX 卫星观测的南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量分布

Fig. 8 Distributions of 19~27 MeV differential energetic proton flux 2 days before the storm time, each 2 days after the storm time and quiet time based on the observation of SAMPEX (SYM-$H < -50$)

示. 平静时期数据的取法与 2.1 节类似. 从图 8 中可知, 在地磁暴 SYM-H 达到最小值后的开始两天中, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量明显下降, 主要表现为地磁扰动对南大西洋异常区的瞬时影响. 在随后的 8 天时间中其通量不断增强, 不断趋近于地磁平静时期的平均结果. 该现象表现为地

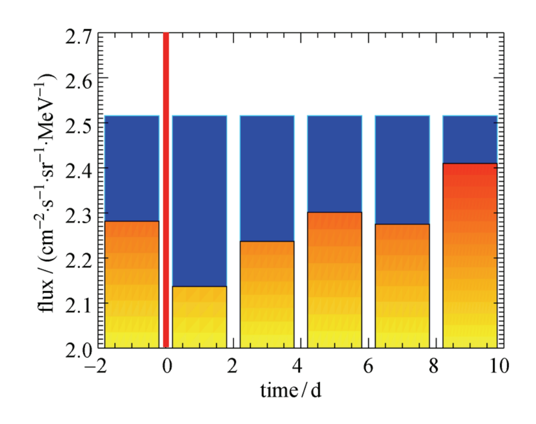


图 9 1992 年 7 月至 2004 年 6 月中等及以上磁暴 SYM-H 达到最小值前后每两天内基于 SAMPEX 卫星观测的南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量最大值变化情况 (蓝色柱代表平静时刻峰值, 红线为磁暴期间 SYM-H 最小值时刻, 橘红色为 19~27 MeV 高能质子微分通量最大值)

Fig. 9 Peak value of 19~27 MeV differential energetic proton flux 2 days before the storm time, each 2 days after the storm time (SYM-$H < -50$). The blue bars stand for quiet time average level. The red line stands for storm time. The orange bars stand for 19~27 MeV differential energetic proton flux.

磁扰动对南大西洋异常区持续影响逐步恢复的过程. 图 9 给出了磁暴前 2 天 (前 48 h), 磁暴后 2 天 (后 48 h), 3~4 天, 5~6 天, 7~8 天等及平静时期南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量峰值的变化过程. 结果更加清晰显示出地磁扰动过后南大西洋异常区的恢复过程.

鉴于目前的数据精度与 $F_{10.7}$ 及高度区间范围带来的影响, 目前还无法确认地磁扰动对南大西洋异常区的影响到底有多长时间, 即多长时间后才能恢复地磁扰动之前的水平. 不过可以确认的是, 地磁扰动对南大西洋异常区的影响不仅具有瞬时影响效应, 同时还具有持续影响效应.

3 结果与讨论

在 L 值较大区域, 在大磁暴期间出现的内辐射带质子损失事件被认为是由于高能粒子在内辐射带的绝热运动不变量被破坏所造成的. 在大磁暴发生时, 地磁场的剧烈扭曲会使得地磁场磁力线的曲率增加, 进而导致高能粒子绝热不变量被破坏 [26−28]. 然而 SAMPEX 卫星观测数据在 $L = 1.1$~3.2 之间, 背景磁场相对较强, 粒子投掷角散射可能是南大西洋异常区高能质子微分通量减少的主要机制. 磁暴发生后 2 天内, 高能质子微分通量较平静时期差别很大, 在图 8 和图 9 中表现为异常区高通量区域的面积和高能质子微分通量峰值的急剧减小. 这是因为投掷角散射使粒子的镜点沿磁力线向低高度扩散, 粒子被稠密大气捕获, 进而表现为南大西洋异常区高能质子微分通量减小 [29]. 在地磁扰动之后 3~4 天, 5~6 天, 7~8 天等时期, 南大西洋异常区 19~27 MeV 高能质子微分通量峰值变化是逐渐增长的, 并且逐步接近于平静时期的结果. 这是由于磁暴恢复相期间, 粒子投掷角散射减弱, 被稠密大气耗散的粒子减少, 在南大西洋异常区中被捕获的粒子逐渐增多, 表现为南大西洋异常区高能质子微分通量增加.

利用 SAMPEX 卫星观测到的 19~27 MeV 高能质子微分通量数据, 研究了不同条件下南大西洋异常区高能质子微分通量的分布特征. 总体分析, 南大西洋异常区高能质子微分通量具有以下特征.

(1) 南大西洋异常区高能质子微分通量分布总体位置较为稳定, 但是随着高度以及 $F_{10.7}$ 和不同 SYM-H 指数的差异其通量分布存在较大变化.

(2) 地磁平静时期, $F_{10.7} < 115$ sfu 和 $F_{10.7} \geqslant 115$ sfu 时, 高能质子微分通量与高度存在正相关关系. 但当 $F_{10.7} \geqslant 115$ sfu 时, 在 520~560 km 之间其变化较为平缓.

(3) 地磁平静时期, 在 540±25 km 高度上, 高能质子微分通量与 $F_{10.7}$ 存在明显的反相关关系. 在 $F_{10.7} \geqslant 115$ sfu 时, 高能质子微分通量变化较平缓.

(4) 磁暴期间高能质子微分通量与 SYM-H 指数存在正相关关系. 磁暴发生之后, 高能质子微分通量下降较快, 随着时间的推移再慢慢上升, 高能质子微分通量在 SYM-H 指数达到最小值后存在明显的延迟效应. 但是由于受到数据精度的限制以及 $F_{10.7}$ 与高度区间范围带来的影响, 很难得到地磁扰动影响南大西洋异常区高能质子微分通量的精确时间.

致谢 SAMPEX 数据来源于加州理工学院 SAMPEX 数据中心 (SAMPEX Data Center), $F_{10.7}$ 数据来源于美国国家地球物理数据中心 (National Geophysical Data Center), SYM-H 指数来源于日本京都世界地磁数据中心网 (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan).

参考文献

[1] Li X, Baker D N, Kanekal S G, *et al.* Long term measurements of radiation belts by SAMPEX and their variations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(20):3827-3830

[2] Shi Liqin, Lin Ruilin, Liu Siqing, *et al.* Effect of solar cycle activity on high energy proton of inner radiation belt in the low altitude region [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 804-811

[3] Miyoshi Y, Morioka A, Misawa H, *et al.* Rebuilding process of the outer radiation belt during the 3 November 1993 magnetic storm: NOAA and Exos-D observations [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2003, **108**(A1): SMP 3-1-SMP 3-15

[4] Looper M D, Blake J B, Mewaldt R A. Response of the inner radiation belt to the violent Sun-Earth connection events of October—November 2003 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**; L030506, doi:10.1029/2004GL021502

[5] Zou H, Zong Q G, Parks G K, *et al.* Response of high-energy protons of the inner radiation belt to large magnetic storms [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2011, **116**, A10229

[6] Ginet G P, O'Brien T P, Huston S L, *et al.* AE9, AP9 and SPM: New models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment [J]. *Space Sci. Rev.*, 2013, **179**(1-4):579-615

[7] Meffert J D, Gussenhoven M S. CRRESPRO documentation [R]. Bedford, Massachusetts: Phillips Laboratory, Hanscom Air Force Base, 1994

[8] Huston S L, Kuck G A, Pfitzer K A. Low altitude trapped radiation model using TIROS/NOAA data [J]. *Geophys. Monog. Ser.*, 1996, **97**:119-122

[9] Boscher D M, Bourdarie S A, Friedel R H W, *et al.* Model for the geostationary electron environment: POLE [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2003, **50**(6):2278-2283

[10] Heynderickx D, Kruglanski M, Pierrard V, *et al.* A low altitude trapped proton model for solar minimum conditions based on SAMPEX/PET data [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1999, **46**(6):1475-1480

[11] Roeder J L, Chen M W, Fennell J F, *et al.* Empirical models of the low-energy plasma in the inner magnetosphere [J]. *Space Weather*, 2005, **3**, S12B06

[12] Hartmann G A, Pacca I G. Time evolution of the South Atlantic magnetic anomaly [J]. *Anais Acad. Bras. Ciênc.*, 2009, **81**(2):243-255

[13] Li Baoquan, Zhu Guangwu, Wang Shijing, *et al.* The space particle composition detector on board FY-1C satellite and the analysis of particle radiation in the South Atlantic Anomaly Region [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2004, **47**(6):1074-1078

[14] Liu Siqing, Liu Jing, Shi Linqin, *et al.* Space environment support for the SZ-5 spacecraft [J]. *Physics*, 2004, **33**(5):359-366

[15] Badhwar G D. Drift rate of the South Atlantic anomaly [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1997, **102**(A2): 2343-2349

[16] Hell N, Bamberg R S. The Evolution of the South Atlantic Anomaly Measured by RHESSI [M]. Erlangen-Nürnberg: Elangen Centre for Astroparticle Physics, Friedrich-Alexander-Universität, 2010

[17] Pu Zuyin, Fang Xiaohua, Jiao Weixin. Study on inner radiation belt space climate [J]. *Science China: A*, 2000, **1**:131-135

[18] Lin C S, Yeh H C. Satellite observations of electric fields in the South Atlantic anomaly region during the July 2000 magnetic storm [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2005, **110**, A03305

[19] Asikainen T, Mursula K. Filling the South Atlantic anomaly by energetic electrons during a great magnetic storm [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(16):1-4

[20] Asikainen T, Mursula K. Energetic electron flux behavior at low L-shells and its relation to the South Atlantic Anomaly [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2008, **70**(2):532-538

[21] Barnes C E, Ott M N, Johnston A H, *et al.* Recent photonics activities under the NASA electronic parts and packaging (NEPP) program [C]//International Symposium on Optical Science and Technology. Seattle: International Society for Optics and Photonics, 2002:189-204

[22] Wang Tongquan, Dai Hongyi, Shen Yongping, *et al.* Calculation of cosmic high energy proton induced single event upset rate [J]. *J. Nat. Univ. Def. Tech.*, 2002, **24**(2):11-13

[23] Du Heng, Ye Zonghai. LEO spacecraft Space Environment Manual [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996

[24] Gu Shifen, Zang Zhenqun, Shi Linqin, *et al.* Study on SEU occurred on board of several space shuttles [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1997, **18**(3):253-260

[25] Baker D N, Mason G M, Figueroa O, *et al.* An overview of the solar anomalous, and magnetospheric particle explorer (SAMPEX) mission [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2014, **31**(3):531-541

[26] Hudson M K, Elkington S R, Lyon J G, *et al.* Simulations of radiation belt formation during storm sudden commencements [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1997, **102**(A7):14087-14102

[27] Young S L, Denton R E, Anderson B J, *et al.* Magnetic field line curvature induced pitch angle diffusion in the inner magnetosphere [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2008, **113**, A03210

[28] Summers D, Thorne R M. Relativistic electron pitch-angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2003, **108**, SMP2

[29] He Zhaoguo. Research on the enhancements of energetic outer radiation belt electron fluxes driven by chorus wave during magnetic storm [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2011